

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2003-161882

(P2003-161882A)

(43)公開日 平成15年6月6日(2003.6.6)

| (51)Int.Cl. ⁷ | 識別記号 | F I | マークコード*(参考) |
|--------------------------|-------|--------------|-------------|
| G 02 B 13/24 | | G 02 B 13/24 | 2 H 0 8 7 |
| 1/02 | | 1/02 | 2 H 0 9 7 |
| 13/14 | | 13/14 | 5 F 0 4 6 |
| G 03 F 7/20 | 5 0 2 | G 03 F 7/20 | 5 0 2 |
| H 01 L 21/027 | | H 01 L 21/30 | 5 1 5 D |

審査請求 未請求 請求項の数12 OL (全17頁)

(21)出願番号 特願2001-363540(P2001-363540)

(71)出願人 000004112

株式会社ニコン

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号

(22)出願日 平成13年11月29日(2001.11.29)

(72)発明者 池沢 弘範

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株

式会社ニコン内

(72)発明者 大村 泰弘

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株

式会社ニコン内

(74)代理人 100095256

弁理士 山口 孝雄

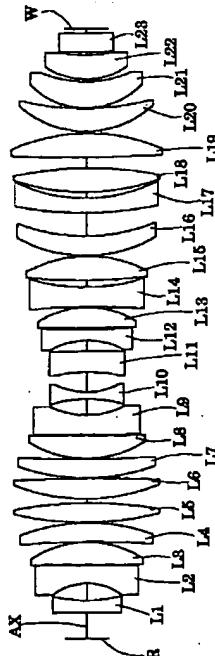
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 投影光学系、露光装置および露光方法

(57)【要約】

【課題】 たとえば萤石のような固有複屈折を示す結晶材料を用いても、複屈折の影響を実質的に受けることなく良好な光学性能を有する投影光学系。

【解決手段】 結晶材料で形成された複数の結晶透過部材と、非結晶材料で形成された非結晶透過部材とを備え、第1面(R)の像を第2面(W)に形成する。複数の結晶透過部材は、結晶軸[100]と光軸とがほぼ一致するように形成された第1群の光透過部材(L22)と、結晶軸[100]と光軸とがほぼ一致するように形成され且つ第1群の光透過部材に対して光軸を中心としてほぼ45度だけ相対的に回転した位置関係を有する第2群の結晶透過部材(L23)とを備えている。非結晶透過部材(L19)は、複数の結晶透過部材の複屈折の影響を補償するための所定の複屈折分布を有する。



1

【特許請求の範囲】

【請求項1】 立方晶系に属する結晶材料で形成された複数の結晶透過部材と、所定の非結晶材料で形成された少なくとも1つの非結晶透過部材とを備え、第1面の像を第2面に形成する投影光学系において、前記複数の結晶透過部材は、結晶軸[100]または該結晶軸[100]と光学的に等価な結晶軸と光軸とがほぼ一致するように形成された第1群の光透過部材と、結晶軸[100]または該結晶軸[100]と光学的に等価な結晶軸と光軸とがほぼ一致するように形成され且つ前記第1群の光透過部材に対して光軸を中心としてほぼ45度だけ相対的に回転した位置関係を有する第2群の光透過部材と備え、前記少なくとも1つの非結晶透過部材は、前記複数の結晶透過部材の複屈折の影響を補償するための所定の複屈折分布を有することを特徴とする投影光学系。

【請求項2】 前記所定の複屈折分布は、周方向に進相軸がある複屈折分布であることを特徴とする請求項1に記載の投影光学系。

【請求項3】 前記複数の結晶透過部材は、結晶軸[111]または該結晶軸[111]と光学的に等価な結晶軸と光軸とがほぼ一致するように形成された第3群の光透過部材と、結晶軸[111]または該結晶軸[111]と光学的に等価な結晶軸と光軸とがほぼ一致するように形成され且つ前記第3群の光透過部材に対して光軸を中心としてほぼ60度だけ相対的に回転した位置関係を有する第4群の光透過部材とをさらに備えていることを特徴とする請求項1に記載の投影光学系。

【請求項4】 前記所定の複屈折分布は、周方向に進相軸がある複屈折分布または径方向に進相軸がある複屈折分布であることを特徴とする請求項3に記載の投影光学系。

【請求項5】 立方晶系に属する結晶材料で形成された複数の結晶透過部材と、所定の非結晶材料で形成された少なくとも1つの非結晶透過部材とを備え、第1面の像を第2面に形成する投影光学系において、前記複数の結晶透過部材は、結晶軸[100]または該結晶軸[100]と光学的に等価な結晶軸と光軸とがほぼ一致するように形成された第5群の光透過部材と、

[111]または該結晶軸[111]と光学的に等価な結晶軸と光軸とがほぼ一致するように形成された第6群の光透過部材と、結晶軸[111]または該結晶軸[111]と光学的に等価な結晶軸と光軸とがほぼ一致するように形成され且つ前記第6群の光透過部材に対して光軸を中心としてほぼ60度だけ相対的に回転した位置関係を有する第7群の光透過部材と備え、前記複数の結晶透過部材の複屈折の影響を補償するための所定の複屈折分布を有することを特徴とする投影光学系。

【請求項6】 前記所定の複屈折分布は、径方向に進相

10

2

軸がある複屈折分布であることを特徴とする請求項5に記載の投影光学系。

【請求項7】 立方晶系に属する結晶材料で形成された複数の結晶透过部材と、所定の非結晶材料で形成された少なくとも1つの非結晶透过部材とを備え、第1面の像を第2面に形成する投影光学系において、前記少なくとも1つの非結晶透过部材は、前記複数の結晶透过部材の複屈折の影響を補償するために、光軸に関して実質的に非回転対称な複屈折分布を有することを特徴とする投影光学系。

【請求項8】 立方晶系に属する結晶材料で形成された複数の結晶透过部材と、所定の非結晶材料で形成された少なくとも1つの非結晶透过部材とを備え、第1面の像を第2面に形成する投影光学系において、

前記少なくとも1つの非結晶透过部材は、前記複数の結晶透过部材の複屈折の影響を補償するための所定の複屈折分布を有し、

前記第1面の光軸上の1点から出た光束が前記少なくとも1つの非結晶透过部材の各面に入射するときの光束の直径をPnとし、前記少なくとも1つの非結晶透过部材の有効直径をEnとするとき、

$$Pn / En < 0.7$$

の条件を満たすことを特徴とする投影光学系。

【請求項9】 前記所定の非結晶材料は、石英またはフッ素がドープされた石英であることを特徴とする請求項1乃至8のいずれか1項に記載の投影光学系。

【請求項10】 前記立方晶系に属する結晶材料は、フッ化カルシウムまたはフッ化バリウムであることを特徴とする請求項1乃至9のいずれか1項に記載の投影光学系。

【請求項11】 前記第1面に設定されたマスクを照明するための照明系と、

前記マスクに形成されたパターンの像を前記第2面に設定された感光性基板上に形成するための請求項1乃至10のいずれか1項に記載の投影光学系とを備えていることを特徴とする露光装置。

【請求項12】 前記第1面に設定されたマスクを照明し、請求項1乃至10のいずれか1項に記載の投影光学系を介して前記マスクに形成されたパターンの像を前記第2面に設定された感光性基板上に投影露光することを特徴とする露光方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、投影光学系、露光装置および露光方法に関し、特に半導体素子や液晶表示素子などのマイクロデバイスをフォトリソグラフィ工程で製造する際に使用される露光装置に好適な投影光学系に関するものである。

【0002】

【従来の技術】半導体集積回路や液晶ディスプレイ等の

50

電子デバイス（マイクロデバイス）の微細パターンの形成に際して、形成すべきパターンを4～5倍程度に比例拡大して描画したフォトマスク（レチクルとも呼ぶ）のパターンを、投影露光装置を用いてウェハ等の感光性基板（被露光基板）上に縮小露光転写する方法が用いられている。この種の投影露光装置では、半導体集積回路の微細化に対応するために、その露光波長が短波長側へシフトし続けている。

【0003】現在、露光波長はKrFエキシマレーザーの248nmが主流となっているが、より短波長のArFエキシマレーザーの193nmも実用化段階に入りつつある。さらに、波長157nmのF₂レーザーや波長146nmのKr₂レーザー、波長126nmのAr₂レーザー等の、いわゆる真空紫外域と呼ばれる波長帯の光を供給する光源を使用する投影露光装置の提案も行なわれている。また、投影光学系の大開口数（NA）化によっても高解像度化が可能であるため、露光波長の短波長化のための開発だけでなく、より大きい開口数を有する投影光学系の開発もなされている。

【0004】このように波長の短い紫外域の露光光に対しては、透過率や均一性の良好な光学材料（レンズ材料）は限定される。ArFエキシマレーザーを光源とする投影光学系では、レンズ材料として合成石英ガラスも使用可能であるが、1種類のレンズ材料では色収差の補正を十分に行うことができないので、一部のレンズにフッ化カルシウム結晶（萤石）が用いられる。一方、F₂レーザーを光源とする投影光学系では、使用可能なレンズ材料は実質上フッ化カルシウム結晶（萤石）に限定される。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】最近、このように波長の短い紫外線に対しては、立方晶系に属する結晶材料であるフッ化カルシウム結晶（萤石）においても、固有複屈折が存在することが報告されている。電子デバイスの製造に用いられる投影光学系のような超高精度の光学系においては、レンズ材料の複屈折に伴って生じる収差は致命的であり、複屈折の影響を実質的に回避したレンズ構成およびレンズ設計の採用が不可欠である。

【0006】本発明は、前述の課題に鑑みてなされたものであり、たとえば萤石のような固有複屈折を示す結晶材料を用いても、複屈折の影響を実質的に受けることなく良好な光学性能を有する投影光学系を提供することを目的とする。また、本発明では、複屈折の影響を実質的に受けことなく良好な光学性能を有する投影光学系を用いて、高解像で高精度な投影露光を行うことのできる露光装置および露光方法を提供することを目的とする。

【0007】

【課題を解決するための手段】前記課題を解決するために、本発明の第1発明では、立方晶系に属する結晶材料で形成された複数の結晶透過部材と、所定の非結晶材料

で形成された少なくとも1つの非結晶透過部材とを備え、第1面の像を第2面に形成する投影光学系において、前記複数の結晶透过部材は、結晶軸[100]または該結晶軸[100]と光学的に等価な結晶軸と光軸とがほぼ一致するように形成された第1群の光透過部材と、結晶軸[100]または該結晶軸[100]と光学的に等価な結晶軸と光軸とがほぼ一致するように形成され且つ前記第1群の光透過部材に対して光軸を中心としてほぼ45度だけ相対的に回転した位置関係を有する第2群の光透過部材とを備え、前記少なくとも1つの非結晶透過部材は、前記複数の結晶透過部材の複屈折の影響を補償するための所定の複屈折分布を有することを特徴とする投影光学系を提供する。この場合、前記所定の複屈折分布は、周方向に進相軸がある複屈折分布であることが好ましい。

【0008】第1発明の好ましい態様によれば、前記複数の結晶透過部材は、結晶軸[111]または該結晶軸[111]と光学的に等価な結晶軸と光軸とがほぼ一致するように形成された第3群の光透過部材と、結晶軸[111]または該結晶軸[111]と光学的に等価な結晶軸と光軸とがほぼ一致するように形成され且つ前記第3群の光透過部材に対して光軸を中心としてほぼ60度だけ相対的に回転した位置関係を有する第4群の光透過部材とをさらに備えている。この場合、前記所定の複屈折分布は、周方向に進相軸がある複屈折分布または径方向に進相軸がある複屈折分布であることが好ましい。

【0009】本発明の第2発明では、立方晶系に属する結晶材料で形成された複数の結晶透過部材と、所定の非結晶材料で形成された少なくとも1つの非結晶透過部材とを備え、第1面の像を第2面に形成する投影光学系において、前記複数の結晶透過部材は、結晶軸[100]または該結晶軸[100]と光学的に等価な結晶軸と光軸とがほぼ一致するように形成された第5群の光透過部材と、[111]または該結晶軸[111]と光学的に等価な結晶軸と光軸とがほぼ一致するように形成された第6群の光透過部材と、結晶軸[111]または該結晶軸[111]と光学的に等価な結晶軸と光軸とがほぼ一致するように形成され且つ前記第6群の光透過部材に対して光軸を中心としてほぼ60度だけ相対的に回転した位置関係を有する第7群の光透過部材とを備え、前記少なくとも1つの非結晶透過部材は、前記複数の結晶透過部材の複屈折の影響を補償するための所定の複屈折分布を有することを特徴とする投影光学系を提供する。この場合、前記所定の複屈折分布は、径方向に進相軸がある複屈折分布であることが好ましい。

【0010】本発明の第3発明では、立方晶系に属する結晶材料で形成された複数の結晶透過部材と、所定の非結晶材料で形成された少なくとも1つの非結晶透過部材とを備え、第1面の像を第2面に形成する投影光学系において、前記少なくとも1つの非結晶透過部材は、前記

複数の結晶透過部材の複屈折の影響を補償するために、光軸に関して実質的に非回転対称な複屈折分布を有することを特徴とする投影光学系を提供する。

【0011】本発明の第4発明では、立方晶系に属する結晶材料で形成された複数の結晶透過部材と、所定の非結晶材料で形成された少なくとも1つの非結晶透過部材とを備え、第1面の像を第2面に形成する投影光学系において、前記少なくとも1つの非結晶透過部材は、前記複数の結晶透過部材の複屈折の影響を補償するための所定の複屈折分布を有し、前記第1面の光軸上の1点から出た光束が前記少なくとも1つの非結晶透过部材の各面に入射するときの光束の直径をPnとし、前記少なくとも1つの非結晶透過部材の有効直径をEnとするとき、 $P_n / E_n < 0.7$ の条件を満たすことを特徴とする投影光学系を提供する。

【0012】第1発明～第4発明の好ましい態様によれば、前記所定の非結晶材料は、石英またはフッ素がドープされた石英である。また、前記立方晶系に属する結晶材料は、フッ化カルシウムまたはフッ化バリウムであることが好ましい。

【0013】本発明の第5発明では、前記第1面に設定されたマスクを照明するための照明系と、前記マスクに形成されたパターンの像を前記第2面に設定された感光性基板上に形成するための第1発明～第4発明の投影光学系とを備えていることを特徴とする露光装置を提供する。

【0014】本発明の第6発明では、パターンが形成されたマスクを照明し、照明された前記パターンの像を第1発明～第4発明の投影光学系を介して感光性基板上に形成することを特徴とする露光方法を提供する。

【0015】

【発明の実施の形態】図1は、萤石の結晶軸方位について説明する図である。図1を参照すると、萤石の結晶軸は、立方晶系のXYZ座標系に基づいて規定される。すなわち、+X軸に沿って結晶軸[100]が、+Y軸に沿って結晶軸[010]が、+Z軸に沿って結晶軸[001]がそれぞれ規定される。

【0016】また、XZ平面において結晶軸[100]および結晶軸[001]と45度をなす方向に結晶軸[101]が、XY平面において結晶軸[100]および結晶軸[010]と45度をなす方向に結晶軸[110]が、YZ平面において結晶軸[010]および結晶軸[001]と45度をなす方向に結晶軸[011]がそれぞれ規定される。さらに、+X軸、+Y軸および+Z軸に対して等しい鋭角をなす方向に結晶軸[111]が規定される。

【0017】なお、図1では、+X軸、+Y軸および+Z軸で規定される空間における結晶軸のみを図示しているが、他の空間においても同様に結晶軸が規定される。

前述したように、萤石では、図1中実線で示す結晶軸

[111]方向、およびこれと等価な不図示の結晶軸[-111]、[1-11]、[11-1]方向では、複屈折がほぼ零（最小）である。

【0018】同様に、図1中実線で示す結晶軸[100]、[010]、[001]方向においても、複屈折がほぼ零（最小）である。一方、図1中破線で示す結晶軸[110]、[101]、[011]、およびこれと等価な不図示の結晶軸[-110]、[-101]、

[01-1]方向では、複屈折が最大である。

【0019】前述したように、2001年5月15日に開かれたリソグラフィに関するシンポジウム（2nd International Symposium on 157nm Lithography）において、米国NISTのJohn H. Burnettらにより、萤石には固有複屈折（intrinsic birefringence）が存在することを実験および理論の両面から確認したことが発表された。

【0020】この発表によれば、萤石は、結晶軸[110]、[-110]、[101]、[-101]、[011]、[01-1]の6方向において、波長157nm

20mの光に対して最大で6.5nm/cm、波長193nmの光に対して最大で3.6nm/cmの複屈折の値を有する。これらの複屈折の値はランダムな複屈折の許容値とされる1nm/cmよりも実質的に大きい値であり、しかもランダムでない分だけ複数のレンズを通して複屈折の影響が蓄積する可能性がある。

【0021】Burnettらは、上述の発表において、複屈折の影響を低減する手法を開示している。図2は、Burnettらの手法を説明する図であって、光線の入射角（光線と光軸とのなす角度）に対する複屈折率の分布を示している。図2では、図中破線で示す5つの同心円が1目盛り10度を表している。したがって、最も内側の円が光軸に対して入射角10度の領域を、最も外側の円が光軸に対して入射角50度の領域を表している。

【0022】また、黒丸は比較的大きな屈折率を有する複屈折のない領域を、白丸は比較的小さな屈折率を有する複屈折のない領域を表している。一方、太い円および長い両矢印は複屈折のある領域における比較的大きな屈折率の方向を、細い円および短い両矢印は複屈折のある領域における比較的小さな屈折率の方向を表している。以降の図3においても、上述の表記は同様である。

【0023】Burnettらの手法では、一対の萤石レンズ（萤石で形成されたレンズ）の光軸と結晶軸[111]とを一致させ、且つ光軸を中心として一対の萤石レンズを60度だけ相対的に回転させる。したがって、一方の萤石レンズにおける複屈折率の分布は図2(a)に示すようになり、他方の萤石レンズにおける複屈折率の分布は図2(b)に示すようになる。その結果、一対の萤石レンズ全体における複屈折率の分布は、図2(c)に示すようになる。

【0024】この場合、図2(a)および(b)を参照

すると、光軸と一致している結晶軸 [111] に対応する領域は、比較的小さな屈折率を有する複屈折のない領域となる。また、結晶軸 [100], [010], [001] に対応する領域は、比較的大きな屈折率を有する複屈折のない領域となる。さらに、結晶軸 [110], [101], [011] に対応する領域は、周方向の偏光に対する屈折率が比較的小さく径方向の偏光に対する屈折率が比較的大きい複屈折領域となる。このように、個々の蛍石レンズでは、光軸から 35.26 度（結晶軸 [111] と結晶軸 [110] のなす角度）の領域において、複屈折の影響を最大に受けることがわかる。

【0025】一方、図2（c）を参照すると、一対の蛍石レンズを 60 度だけ相対的に回転させることにより、一対の蛍石レンズ全体では、複屈折が最大である結晶軸 [110], [101], [011] の影響が薄められることがわかる。そして、光軸から 35.26 度の領域において、径方向の偏光に対する屈折率よりも周方向の偏光に対する屈折率が小さい複屈折領域が残ることになる。換言すれば、Burnettらの手法を用いることにより、光軸に関して回転対称な分布が残るが、複屈折の影響をかなり低減することができる。

【0026】本発明において提案する手法では、一対の蛍石レンズ（一般には蛍石で形成された透過部材）の光軸と結晶軸 [100]（または該結晶軸 [100] と光学的に等価な結晶軸）とを一致させ、且つ光軸を中心として一対の蛍石レンズを約 45 度だけ相対的に回転させる。ここで、結晶軸 [100] と光学的に等価な結晶軸とは、結晶軸 [010], [001] である。

【0027】図3は、本発明の手法を説明する図であって、光線の入射角（光線と光軸とのなす角度）に対する複屈折率の分布を示している。本発明の手法では、一方の蛍石レンズにおける複屈折率の分布は図3（a）に示すようになり、他方の蛍石レンズにおける複屈折率の分布は図3（b）に示すようになる。その結果、一対の蛍石レンズ全体における複屈折率の分布は、図3（c）に示すようになる。

【0028】図3（a）および（b）を参照すると、本発明の手法では、光軸と一致している結晶軸 [100] に対応する領域は、比較的大きな屈折率を有する複屈折のない領域となる。また、結晶軸 [111], [1-11], [-111], [11-1] に対応する領域は、比較的小さな屈折率を有する複屈折のない領域となる。さらに、結晶軸 [101], [10-1], [110], [1-10] に対応する領域は、周方向の偏光に対する屈折率が比較的大きく径方向の偏光に対する屈折率が比較的小さい複屈折領域となる。このように、個々の蛍石レンズでは、光軸から 45 度（結晶軸 [100] と結晶軸 [101] のなす角度）の領域において、複屈折率の影響を最大に受けることがわかる。

【0029】一方、図3（c）を参照すると、一対の蛍

石レンズを 45 度だけ相対的に回転させることにより、一対の蛍石レンズ全体では、複屈折が最大である結晶軸 [101], [10-1], [110], [1-10] の影響がかなり薄められ、光軸から 45 度の領域において径方向の偏光に対する屈折率よりも周方向の偏光に対する屈折率が大きい複屈折領域が残ることになる。換言すれば、本発明の手法を用いることにより、光軸に関して回転対称な分布が残るが、複屈折の影響をかなり低減することができる。

【0030】なお、本発明の手法において、一方の蛍石レンズと他方の蛍石レンズとを光軸を中心として約 45 度だけ相対的に回転させると、一方の蛍石レンズおよび他方の蛍石レンズにおける光軸とは異なる方向に向けられる所定の結晶軸（たとえば結晶軸 [010], [001], [011] または [01-1]）同士の光軸を中心とした相対的な角度が約 45 度であることを意味する。具体的には、たとえば一方の蛍石レンズにおける結晶軸 [010] と、他方の蛍石レンズにおける結晶軸 [010] との光軸を中心とした相対的な角度が約 45 度であることを意味する。

【0031】また、図3（a）および図3（b）からも明らかな通り、結晶軸 [100] を光軸とする場合には、光軸を中心とした複屈折の影響の回転非対称性が 90 度の周期で現れる。したがって、本発明の手法において、光軸を中心として約 45 度だけ相対的に回転させるということは、光軸を中心として約 45 度 + (n × 90 度) だけ相対的に回転させること、すなわち 45 度、135 度、225 度、または 315 度・・・だけ相対的に回転させることと同じ意味である（ここで、n は整数である）。

【0032】一方、Burnett らの手法において、一方の蛍石レンズと他方の蛍石レンズとを光軸を中心として約 60 度だけ相対的に回転させると、一方の蛍石レンズおよび他方の蛍石レンズにおける光軸とは異なる方向に向けられる所定の結晶軸（たとえば結晶軸 [-111], [11-1]、[1-11]、または [1-11]）同士の光軸を中心とした相対的な角度が約 60 度であることを意味する。具体的には、たとえば一方の蛍石レンズにおける結晶軸 [-111] と、他方の蛍石レンズにおける結晶軸 [-111] との光軸を中心とした相対的な角度が約 60 度であることを意味する。

【0033】また、図2（a）および図2（b）からも明らかな通り、結晶軸 [111] を光軸とする場合には、光軸を中心とした複屈折の影響の回転非対称性が 120 度の周期で現れる。したがって、Burnett らの手法において、光軸を中心として約 60 度だけ相対的に回転させるということは、光軸を中心として約 60 度 + (n × 120 度) だけ相対的に回転させること、すなわち 60 度、180 度、または 300 度・・・だけ相対的に回転させることと同じ意味である（ここで、n は整数である）。

る)。

【0034】上述の説明の通り、一对の蛍石レンズの光軸と結晶軸〔111〕とを一致させ、且つ光軸を中心として一对の蛍石レンズを60度だけ相対的に回転させることにより、あるいは一对の蛍石レンズの光軸と結晶軸〔100〕とを一致させ、且つ光軸を中心として一对の蛍石レンズを45度だけ相対的に回転させることにより、光軸に関して回転対称な分布が残るが、複屈折の影響をかなり低減することができる。

【0035】ここで、一对の蛍石レンズの光軸と結晶軸〔111〕とを一致させて60度相対回転させたときに残存する回転対称な分布と、一对の蛍石レンズの光軸と結晶軸〔100〕とを一致させて45度相対回転させたときに残存する回転対称な分布とは逆向きである。換言すれば、光軸と結晶軸〔111〕とを一致させて60度相対回転させた一对の蛍石レンズ(以下、「結晶軸〔111〕のペアレンズ」という)における進相軸と、結晶軸〔100〕とを一致させて45度相対回転させた一对の蛍石レンズ(以下、「結晶軸〔100〕のペアレンズ」という)における進相軸とは直交する。

【0036】さらに別の表現をすれば、一对の蛍石レンズの光軸と結晶軸〔100〕とを一致させて45度相対回転させた結晶軸〔100〕のペアレンズでは径方向に進相軸がある複屈折分布が残り、一对の蛍石レンズの光軸と結晶軸〔111〕とを一致させて60度相対回転させた結晶軸〔111〕のペアレンズでは周方向に進相軸がある複屈折分布が残る。なお、試料に複屈折が存在する場合、屈折率の差により当該試料を通過する振動面(偏光面)の直交した2つの直線偏光の光の位相が変化する。すなわち一方の偏光に対して他方の偏光の位相が進んだり遅れたりすることになるが、位相が進む方の偏光方向を進相軸と呼び、位相が遅れる方の偏光方向を遅相軸と呼ぶ。

【0037】ところで、たとえば石英またはフッ素がドープされた石英(以下、「改質石英」と称する)のような非結晶材料で形成された非結晶レンズ(一般には非結晶透過部材)の場合、その理想的な状態では複屈折性が発生しない。しかしながら、石英または改質石英では、不純物が混入した場合や、高温で形成された石英を冷却する際に温度分布が生じた場合には、内部応力による複屈折性が現れる。

【0038】したがって、インゴットに混入させる不純物の量や種類、または熱履歴を調整することにより、石英または改質石英に所望の複屈折分布を発生させることができる。換言すれば、製造時における不純物、熱履歴による密度分布のうちの少なくとも一方を調整することにより、光軸に関して回転対称な所望の複屈折分布または非回転対称な所望の複屈折分布を非結晶レンズに付与することができる。

【0039】なお、不純物としては、OH、Cl、金属

不純物、溶存ガスが挙げられ、ダイレクト法(Direct Method)の場合は、数百ppm以上含有されるOH、次いで数十ppm含有されるClが混入量から支配的であると考えられる。この不純物がインゴットに混入した場合には材料の熱膨張率が変化するので、例えばアニール後に冷却する場合には、不純物が混入した部分の縮み方が大きくなり、この縮み方の差による内部応力が発生し、応力複屈折が生じる。また、熱履歴に関しては、上記ダイレクト法、VAD(vapor axial deposition)法、ソルゲル(sol-gel)法、プラズマバーナ(plasma burner)法などの製造方法によらずに存在する。

【0040】本発明の投影光学系は、たとえば蛍石のような立方晶系に属する結晶材料で形成された複数の結晶透過部材(蛍石レンズなど)と、たとえば石英や改質石英のような非結晶材料で形成された少なくとも1つの非結晶透過部材(石英レンズ、改質石英レンズなど)とを備え、第1面の像を第2面に形成する。すなわち、本発明の投影光学系は、露光装置に適用された場合、第1面上に設定されたマスク(レチクル)のパターン像を第2面上に設定された感光性基板(ウェハなど)に形成する。

【0041】第1発明では、複数の結晶透過部材は、結晶軸〔100〕のペアレンズ(第1群の光透過部材および第2群の光透過部材)を備えている。また、非結晶透過部材は、複数の結晶透過部材の複屈折の影響を補償するための所定の複屈折分布を有する。上述したように、結晶軸〔100〕のペアレンズを導入すると、複屈折の影響をかなり低減することができるが、径方向に進相軸がある複屈折分布が残る。したがって、投影光学系において、結晶軸〔100〕のペアレンズの作用により径方向に進相軸がある複屈折分布が残っている場合には、周方向に進相軸がある複屈折分布を非結晶透過部材に付与することによって、複屈折の影響を実質的に受けることなく良好な光学性能を確保することができる。

【0042】なお、第1発明では、複数の結晶透過部材に結晶軸〔111〕のペアレンズ(第3群の光透過部材および第4群の光透過部材)を追加すると、結晶軸〔100〕のペアレンズと結晶軸〔111〕のペアレンズとを組み合わせることにより、残存する回転対称な分布を小さく抑えることができる。

【0043】この場合、投影光学系において、結晶軸〔100〕のペアレンズの作用が支配的であって、径方向に進相軸がある複屈折分布が残っている場合には、周方向に進相軸がある複屈折分布を非結晶透過部材に付与することによって、複屈折の影響を実質的に受けることなく良好な光学性能を確保することができる。逆に、結晶軸〔111〕のペアレンズの作用が支配的であって、周方向に進相軸がある複屈折分布が残っている場合には、径方向に進相軸がある複屈折分布を非結晶透過部材に付与することによって、複屈折の影響を実質的に受けことなく良好な光学性能を確保することができる。

【0044】第2発明では、複数の結晶透過部材は、結晶軸〔100〕（または該結晶軸〔100〕と光学的に等価な結晶軸）と光軸とがほぼ一致するように形成された結晶軸〔100〕レンズ（第5群の光透過部材）と、結晶軸〔111〕のペアレンズ（第6群の光透過部材および第7群の光透過部材）とを備えている。また、非結晶透過部材は、複数の結晶透過部材の複屈折の影響を補償するための所定の複屈折分布を有する。

【0045】上述したように、結晶軸〔111〕のペアレンズを導入すると、複屈折の影響をかなり低減することができるが、周方向に進相軸がある複屈折分布が残る。一方、結晶軸〔100〕レンズ（ペアレンズではない）を導入すると、図3(a)および(b)に示すように、4回回転対称で且つ全体的に径方向に進相軸がある複屈折分布が残る。その結果、第2発明の投影光学系には、結晶軸〔111〕のペアレンズの作用が支配的になって、周方向に進相軸がある複屈折分布が残ることになる。

【0046】したがって、第2発明の投影光学系では、径方向に進相軸がある複屈折分布を非結晶透過部材に付与することによって、複屈折の影響を実質的に受けることなく良好な光学性能を確保することができる。なお、結晶軸〔100〕レンズの作用により4回回転対称な4θ成分が発生することになるが、リソグラフィでは奇数θ成分とは異なり偶数θ成分はレジスト像に悪影響を及ぼすことが実質的ない。

【0047】なお、後述の実施形態において具体的に示すように、像面（第2面）における複数の結晶透過部材の複屈折の影響は、必ずしも光軸に関して回転対称にはならない（図9(a)～(c)を参照）。換言すれば、複数の結晶透過部材の複屈折による収差には、像高による面内分布が発生することがある。第3発明では、光軸に関して実質的に非回転対称な複屈折分布を非結晶透過部材に付与することによって、複数の結晶透過部材の複屈折の影響を補償し、複屈折の影響を実質的に受けることなく良好な光学性能を確保することができる。

【0048】また、第4発明では、所定の複屈折分布が付与された非結晶透過部材が、その入射面および射出面の双方において次の条件式(1)を満足する。

$$P_n / E_n < 0.7 \quad (1)$$

【0049】ここで、E_nは、非結晶透過部材の有効直径（すなわち露光装置の場合には露光エリア全体から出した光束が非結晶透過部材の各面に入射したときの光束に外接する円の直径）である。また、P_nは、物体面（第1面）の光軸上の1点から出た光束が非結晶透過部材の各面に入射するときの光束の直径（以下、「部分径」という）である。

【0050】複数の結晶透過部材の複屈折による収差の像面内分布を補正するには、所定の複屈折分布が付与された非結晶透過部材が投影光学系の瞳面から離れている

こと、すなわち非結晶透過部材が物体面または像面（第2面）の近傍に配置されていることが必要である。第4発明では、入射面および射出面の双方において条件式

(1)を満足することにより、所定の複屈折分布が付与された非結晶透過部材が物体面または像面の近傍に配置されることになり、複数の結晶透過部材の複屈折の影響を補償し、複屈折の影響を実質的に受けることなく良好な光学性能を確保することができる。

【0051】本発明の実施形態を、添付図面に基づいて説明する。図4は、本発明の実施形態にかかる投影光学系を備えた露光装置の構成を概略的に示す図である。なお、図4において、投影光学系PLの光軸AXに平行にZ軸を、光軸AXに垂直な面内において図4の紙面に平行にY軸を、光軸AXに垂直な面内において図4の紙面に垂直にX軸を設定している。

【0052】図4に示す露光装置は、紫外領域の照明光を供給するための光源LSとして、たとえばArFエキシマーレーザー光源（波長193nm）を備えている。光源LSから射出された光は、照明光学系ILを介して、所定のパターンが形成されたレチクル（マスク）Rを照明する。なお、光源LSと照明光学系ILとの間の光路はケーシング（不図示）で密封されており、光源LSから照明光学系IL中の最もレチクル側の光学部材までの空間は、露光光の吸収率が低い気体であるヘリウムガスや窒素などの不活性ガスで置換されているか、あるいはほぼ真空状態に保持されている。

【0053】レチクルRは、レチクルホルダRHを介して、レチクルステージRS上においてXY平面に平行に保持されている。レチクルRには転写すべきパターンが形成されており、たとえばパターン領域全体のうちX方向に沿って長辺を有し且つY方向に沿って短辺を有する矩形状のパターン領域が照明される。レチクルステージRSは、図示を省略した駆動系の作用により、レチクル面（すなわちXY平面）に沿って二次元的に移動可能であり、その位置座標はレチクル移動鏡RMを用いた干渉計RIFによって計測され且つ位置制御されるように構成されている。

【0054】レチクルRに形成されたパターンからの光は、投影光学系PLを介して、感光性基板であるウェハW上にレチクルパターン像を形成する。ウェハWは、ウェハテーブル（ウェハホルダ）WTを介して、ウェハステージWS上においてXY平面に平行に保持されている。そして、レチクルR上での矩形状の照明領域に光学的に対応するように、ウェハW上ではX方向に沿って長辺を有し且つY方向に沿って短辺を有する矩形状の露光領域にパターン像が形成される。ウェハステージWSは、図示を省略した駆動系の作用によりウェハ面（すなわちXY平面）に沿って二次元的に移動可能であり、その位置座標はウェハ移動鏡WMを用いた干渉計WIFによって計測され且つ位置制御されるように構成されてい

る。

【0055】また、図示の露光装置では、投影光学系PLを構成する光学部材のうち最もレチクル側に配置された光学部材と最もウェハ側に配置された光学部材との間で投影光学系PLの内部が気密状態を保つように構成され、投影光学系PLの内部の気体はヘリウムガスや窒素などの不活性ガスで置換されているか、あるいはほぼ真空状態に保持されている。

【0056】さらに、照明光学系ILと投影光学系PLとの間の狭い光路には、レチクルRおよびレチクルステージRSなどが配置されているが、レチクルRおよびレチクルステージRSなどを密封包囲するケーシング(不図示)の内部に窒素やヘリウムガスなどの不活性ガスが充填されているか、あるいはほぼ真空状態に保持されている。

【0057】また、投影光学系PLとウェハWとの間の狭い光路には、ウェハWおよびウェハステージWSなどが配置されているが、ウェハWおよびウェハステージWSなどを密封包囲するケーシング(不図示)の内部に窒素やヘリウムガスなどの不活性ガスが充填されているか、あるいはほぼ真空状態に保持されている。このように、光源L SからウェハWまでの光路の全体に亘って、露光光がほとんど吸収されることのない雰囲気が形成されている。

【0058】上述したように、投影光学系PLによって規定されるレチクルR上の照明領域およびウェハW上の露光領域(すなわち実効露光領域)は、Y方向に沿って短辺を有する矩形状である。したがって、駆動系および干渉計(RIF、WIF)などを用いてレチクルRおよ*

$$\begin{aligned} z = & \left(y^2 / r \right) / \left[1 + \left\{ 1 - \left(1 + \kappa \right) \cdot y^2 / r^2 \right\}^{1/2} \right] \\ & + C_4 \cdot y^4 + C_6 \cdot y^6 + C_8 \cdot y^8 + C_{10} \cdot y^{10} \\ & + C_{12} \cdot y^{12} + C_{14} \cdot y^{14} \end{aligned}$$

(a)

【0062】図5は、本実施形態にかかる投影光学系のレンズ構成を示す図である。本実施形態の投影光学系PLは、図5に示すように、レチクル側から順に、ウェハ側に非球面状の凹面を向けた平凹レンズL1と、ウェハ側に平面を向けた平凹レンズL2と、レチクル側に平面を向けた平凸レンズL3と、レチクル側に非球面状の凹面を向けた正メニスカスレンズL4と、両凸レンズL5と、両凸レンズL6と、レチクル側に凸面を向けた正メニスカスレンズL7と、ウェハ側に平面を向けた平凸レンズL8と、レチクル側に平面を向けた平凹レンズL9と、両凹レンズL10と、ウェハ側に平面を向けた平凹レンズL11と、ウェハ側に非球面状の凹面を向けた両凹レンズL12と、両凸レンズL13と、ウェハ側に非球面状の凹面を向けた両凹レンズL14と、両凸レンズL15と、レチクル側に凸面を向けた正メニスカスレンズL16と、レチクル側に凸面を向けた負メニスカスレンズL17と、両凸レンズL18と、両凸レンズL19と、レチクル側に凸面を向けた正メニスカスレンズL2と、

*びウェハWの位置制御を行いながら、矩形状の露光領域および照明領域の短辺方向すなわちY方向に沿ってレチクルステージRSとウェハステージWSとを、ひいてはレチクルRとウェハWとを同期的に移動(走査)させることにより、ウェハW上には露光領域の長辺に等しい幅を有し且つウェハWの走査量(移動量)に応じた長さを有する領域に対してレチクルパターンが走査露光される。あるいは、投影光学系PLの光軸AXと直交する平面内においてウェハWを二次元的に駆動制御しながら一括露光を行うことにより、ウェハWの各露光領域にはレチクルRのパターンが逐次露光される。

【0059】以下、具体的な数値例に基づいて、本実施形態の投影光学系PLを説明する。本実施形態では、投影光学系PLを構成する透過部材(屈折光学部材:レンズ成分)は、萤石(CaF₂結晶)または石英で形成されている。また、Ar Fエキシマレーザー光の波長は193nmであり、この露光光に対する萤石の屈折率は1.5014548であり、石英の屈折率は1.5603261である。

【0060】また、非球面は、光軸に垂直な方向の高さをyとし、非球面の頂点における接平面から高さyにおける非球面上の位置までの光軸に沿った距離(サグ量)をzとし、頂点曲率半径をrとし、円錐係数をκとし、n次の非球面係数をC_nとしたとき、以下の式(a)で表される。後述の表(1)において、非球面形状に形成されたレンズ面には面番号の右側に*印を付している。

【0061】

【数1】

0と、ウェハ側に非球面状の凹面を向けた正メニスカスレンズL21と、レチクル側に凸面を向けた正メニスカスレンズL22と、ウェハ側に平面を向けた平凸レンズL23とから構成されている。

【0063】投影光学系PLを構成するレンズL1~L23のうち、L3、L8、L13、L15、L22およびL23は萤石で形成された萤石レンズであり、レンズL1、L2、L4~L7、L9~L12、L14、L16~L21は石英で形成された石英レンズである。そして、石英レンズL19は、所定の複屈折分布が付与されるべき非結晶透過部材を構成している。

【0064】次の表(1)に、本実施形態にかかる投影光学系の諸元の値を掲げる。表(1)の主要諸元において、λは露光光の波長を、βは投影倍率を、NAは像側(ウェハ側)開口数を、Yは像高(イメージフィールド半径)をそれぞれ表している。また、表(1)の光学部材諸元において、面番号はレチクル側からの面の順序を、rは各面の曲率半径(非球面の場合には頂点曲率半

径: mm) を、d は各面の軸上間隔すなわち面間隔 (mm) を、n は露光光に対する屈折率を、En は各面の有効直径 (mm) を、Pn は各面の部分径 (すなわち物体面の光軸上の 1 点から出た光束が各面に入射するときの*)

(主要諸元)

$$\lambda = 193 \text{ nm}$$

$$\beta = -0.25$$

$$NA = 0.85$$

$$Y = 12.1 \text{ mm}$$

(光学部材諸元)

| 面番号 | r | d | n | En | Pn | Pn/En | |
|---------|-----------|--------|-----------|-------|-------|-------|--------|
| (レチクル面) | 51.239 | | | | | | |
| 1 | ∞ | 25.713 | 1.5603261 | 119.1 | 22.3 | 0.19 | (L 1) |
| 2* | 212.184 | 35.411 | | 128.4 | 29.5 | 0.23 | |
| 3 | -103.137 | 37.006 | 1.5603261 | 131.2 | 46.3 | 0.35 | (L 2) |
| 4 | ∞ | 1.500 | | 192.4 | 66.1 | 0.34 | |
| 5 | ∞ | 47.000 | 1.5014548 | 195.4 | 67.3 | 0.34 | (L 3) |
| 6 | -183.264 | 1.000 | | 210.2 | 88.9 | 0.42 | |
| 7* | -1577.700 | 39.307 | 1.5603261 | 236.3 | 91.9 | 0.39 | (L 4) |
| 8 | -337.812 | 1.000 | | 249.6 | 104.7 | 0.42 | |
| 9 | 562.286 | 40.593 | 1.5603261 | 272.6 | 107.6 | 0.39 | (L 5) |
| 10 | -730.269 | 9.069 | | 274.2 | 113.7 | 0.41 | |
| 11 | 351.942 | 42.024 | 1.5603261 | 275.4 | 116.5 | 0.42 | (L 6) |
| 12 | -2955.500 | 1.000 | | 272.4 | 116.2 | 0.43 | |
| 13 | 364.373 | 39.329 | 1.5603261 | 258.2 | 116.0 | 0.45 | (L 7) |
| 14 | 2256.734 | 1.000 | | 246.9 | 111.1 | 0.45 | |
| 15 | 193.967 | 48.000 | 1.5014548 | 218.5 | 109.6 | 0.50 | (L 8) |
| 16 | ∞ | 2.000 | | 203.4 | 96.7 | 0.48 | |
| 17 | ∞ | 40.000 | 1.5603261 | 199.5 | 95.8 | 0.48 | (L 9) |
| 18 | 149.595 | 33.261 | | 141.6 | 81.7 | 0.58 | |
| 19 | -234.916 | 14.000 | 1.5603261 | 136.5 | 77.7 | 0.57 | (L 10) |
| 20 | 123.373 | 41.540 | | 123.9 | 78.1 | 0.63 | |
| 21 | -298.867 | 43.000 | 1.5603261 | 126.7 | 91.4 | 0.72 | (L 11) |
| 22 | ∞ | 22.620 | | 139.3 | 109.2 | 0.78 | |
| 23 | -141.424 | 23.205 | 1.5603261 | 140.9 | 115.5 | 0.82 | (L 12) |
| 24* | 2999.500 | 3.103 | | 169.9 | 141.7 | 0.83 | |
| 25 | 2240.569 | 41.586 | 1.5014548 | 173.0 | 145.5 | 0.84 | (L 13) |
| 26 | -172.475 | 1.000 | | 182.8 | 161.2 | 0.88 | |
| 27 | -1401.661 | 41.000 | 1.5603261 | 194.0 | 172.7 | 0.89 | (L 14) |
| 28* | 414.116 | 14.198 | | 215.9 | 198.5 | 0.92 | |
| 29 | 935.988 | 50.000 | 1.5014548 | 219.1 | 205.8 | 0.94 | (L 15) |
| 30 | -232.953 | 1.000 | | 228.4 | 218.5 | 0.96 | |
| 31 | 254.204 | 40.000 | 1.5603261 | 260.6 | 256.0 | 0.98 | (L 16) |
| 32 | 330.964 | 47.394 | | 256.2 | 253.4 | 0.99 | |
| 33 | 655.780 | 30.000 | 1.5603261 | 266.1 | 266.1 | 1.00 | (L 17) |
| 34 | 287.989 | 12.313 | | 270.2 | 269.6 | 1.00 | |
| 35 | 393.731 | 50.000 | 1.5603261 | 273.2 | 272.2 | 1.00 | (L 18) |
| 36 | -655.215 | 22.490 | | 276.0 | 274.5 | 0.99 | |
| 37 | 2633.133 | 50.000 | 1.5603261 | 284.0 | 278.0 | 0.98 | (L 19) |
| 38 | -339.998 | 3.810 | | 285.3 | 278.2 | 0.98 | |

*光束の直径: mm) を、Pn/E n は有効直径に対する部分径の比をそれぞれ示している。

【0065】

【表1】

| | 17 | 18 |
|-----|---|--------|
| 39 | 185.000 46.380 1.5603261 250.8 237.9 0.95 | (L 20) |
| 40 | 483.174 1.000 240.0 223.5 0.93 | |
| 41 | 148.000 52.000 1.5603261 208.7 194.9 0.93 | (L 21) |
| 42* | 196.741 5.000 171.3 153.8 0.90 | |
| 43 | 136.419 47.655 1.5014548 153.4 137.8 0.90 | (L 22) |
| 44 | 332.239 6.251 107.8 87.9 0.82 | |
| 45 | 2734.387 35.000 1.5014548 100.7 76.7 0.76 | (L 23) |
| 46 | ∞ 9.000 53.2 29.0 0.55 | |

(ウェハ面)

(非球面データ)

2面

 $\kappa = 1.000000$

$C_4 = -1.33721 \times 10^{-7} \quad C_6 = 4.57102 \times 10^{-12}$

$C_8 = -2.57741 \times 10^{-16} \quad C_{10} = 3.59697 \times 10^{-20}$

$C_{12} = -5.61700 \times 10^{-24} \quad C_{14} = 4.42067 \times 10^{-28}$

7面

 $\kappa = 1.000000$

$C_4 = -4.11840 \times 10^{-9} \quad C_6 = -2.19082 \times 10^{-14}$

$C_8 = 5.55237 \times 10^{-21} \quad C_{10} = 2.26811 \times 10^{-23}$

$C_{12} = -1.71805 \times 10^{-27} \quad C_{14} = 2.95229 \times 10^{-32}$

24面

 $\kappa = 1.000000$

$C_4 = 3.17136 \times 10^{-8} \quad C_6 = -1.19732 \times 10^{-12}$

$C_8 = -7.05241 \times 10^{-17} \quad C_{10} = 3.49842 \times 10^{-21}$

$C_{12} = 4.62643 \times 10^{-26} \quad C_{14} = -2.78134 \times 10^{-30}$

28面

 $\kappa = 1.000000$

$C_4 = 3.16556 \times 10^{-8} \quad C_6 = -2.55344 \times 10^{-13}$

$C_8 = -1.69524 \times 10^{-18} \quad C_{10} = 6.45379 \times 10^{-23}$

$C_{12} = 1.11281 \times 10^{-26} \quad C_{14} = -5.33626 \times 10^{-31}$

42面

 $\kappa = 1.000000$

$C_4 = -2.49318 \times 10^{-8} \quad C_6 = 1.14042 \times 10^{-13}$

$C_8 = 4.68142 \times 10^{-18} \quad C_{10} = -8.53537 \times 10^{-22}$

$C_{12} = -3.16562 \times 10^{-26} \quad C_{14} = 9.41438 \times 10^{-31}$

【0066】以下、本実施形態のさらに詳細な説明に先立って、第1比較例～第3比較例を説明する。次の表(2)に、第1比較例における各蛍石レンズの結晶軸の設定状態を示す。表(2)において、Aは各蛍石レンズを、Bは各蛍石レンズの光軸と一致する結晶軸を、Cは結晶軸B以外の特定結晶軸の角度位置をそれぞれ示している。

【0067】なお、角度位置Cは、結晶軸Bが結晶軸[111]であるとき、たとえば結晶軸[-111]の基準方位に対する角度であり、結晶軸Bが結晶軸[100]であるとき、たとえば結晶軸[010]の基準方位

40に対する角度である。ここで、基準方位とは、たとえばレチクル面において光軸AXを通るように任意に設定された方位である。

【0068】したがって、たとえば(B, C) = (100, 0)は、光軸と結晶軸[100]とが一致する蛍石レンズにおいて、その結晶軸[010]が基準方位に沿って配置されていることを意味する。また、(B, C) = (100, 45)は、光軸と結晶軸[100]とが一致する蛍石レンズにおいて、その結晶軸[010]が基準方位に対して45度をなすように配置されていることを意味する。すなわち、(B, C) = (100, 0)の

蛍石レンズと (B, C) = (100, 45) の蛍石レンズとは、結晶軸 [100] のレンズペアを構成していることになる。

【0069】また、たとえば (B, C) = (111, 0) は、光軸と結晶軸 [111] とが一致する蛍石レンズにおいて、その結晶軸 [-111] が基準方位に沿って配置されていることを意味する。また、(B, C) = (111, 60) は、光軸と結晶軸 [111] とが一致する蛍石レンズにおいて、その結晶軸 [-111] が基準方位に対して 60 度をなすように配置されていることを意味する。すなわち、(B, C) = (111, 0) の蛍石レンズと (B, C) = (111, 60) の蛍石レンズとは、結晶軸 [111] のレンズペアを構成していることになる。

【0070】なお、上述の角度位置 C の説明において、基準方位の設定はすべてのレンズに対して共通である必要はなく、たとえば各レンズペアの単位で共通であればよい。また、基準方位に対する角度計測の対象となる特定結晶軸は、結晶軸 [100] のレンズペアの場合に結晶軸 [010] に限定されることなく、結晶軸 [111] のレンズペアの場合に結晶軸 [-111] に限定されることなく、たとえば各レンズペアの単位で適当に設定可能である。表(2)における表記は、以降の表(3)～(5)においても同様である。

【0071】

【表2】

| A | B | C |
|-----|-------|---|
| L3 | [111] | 0 |
| L8 | [111] | 0 |
| L13 | [111] | 0 |
| L15 | [111] | 0 |
| L22 | [111] | 0 |
| L23 | [111] | 0 |

【0072】表(2)を参照すると、第1比較例では、すべての蛍石レンズ L3, L8, L13, L15, L22 および L23において、結晶軸 [111] が光軸と一致するように設定され、且つ光軸を中心として互いに同じ回転位置関係を有するように設定されている。しかしながら、石英レンズ L19 には、複屈折分布が付与されていない。

【0073】図6は、第1比較例における点像強度分布 (PSF: point spread function) を示す図である。図6において、(a) は投影視野の中心 (光軸 AX の位置) に形成される点像における強度分布を、(b) は投影視野の周辺の一端 (図5の紙面の下側) に形成される点像における強度分布を、(c) は投影視野の周辺の他端 (図5の紙面の上側) に形成される点像における強度分布をそれぞれ示している。

【0074】なお、各点像強度分布では、理想結像における光強度を 100% とし、1%～9%までを 1% ピッチで、10%～90%までを 10% ピッチで、点像の光強度分布が等高線状に表現されている。したがって、最も外側の等高線は理想結像における光強度の 1% の光強度に対応し、最も内側の等高線は理想結像における光強度の 90% の光強度に対応している。なお、図6における表記は、以降の図7～図9においても同様である。

【0075】第1比較例では、投影視野の中心に形成される点像における最大光強度が 95.18% であり、投影視野の周辺の一端に形成される点像における最大光強度が 95.19% であり、投影視野の周辺の他端に形成される点像における最大光強度が 95.61% である。すなわち、第1比較例では、すべての蛍石レンズにおいて結晶軸 [111] が光軸と一致するように設定されているので、その複屈折の影響により投影光学系の結像性能が低下していることがわかる。

【0076】また、図6を参照すると、すべての蛍石レンズにおいて結晶軸 [111] が光軸と一致するように設定されているので、図2(a) および (b) に示すように 3 回転対称の複屈折分布が残り易く、投影視野の中心から周辺に亘って点像の光強度分布が全体的に三角形状になっている。その結果、第1比較例の投影光学系を介して露光を行うと、感光性基板 (ウェハ) 上において直交する二方向に沿ってパターンの線幅が実質的に異なることになり、良好な線幅均一性を確保することができない。

【0077】次の表(3)に、第2比較例における各蛍石レンズの結晶軸の設定状態を示す。また、図7は、第2比較例における点像強度分布を示す図である。

【0078】

【表3】

| A | B | C |
|-----|-------|----|
| L3 | [111] | 0 |
| L8 | [111] | 0 |
| L13 | [111] | 0 |
| L15 | [111] | 60 |
| L22 | [111] | 0 |
| L23 | [111] | 60 |

【0079】表(3)を参照すると、第2比較例では、すべての蛍石レンズにおいて結晶軸 [111] が光軸と一致するように設定され、蛍石レンズ L3, L8, L13 および L22 と蛍石レンズ L15 および L23 とは光軸を中心として 60 度だけ相対的に回転した位置関係を有するように設定されている。すなわち、蛍石レンズ L3, L8, L13 および L22 と、蛍石レンズ L15 および L23 とは、結晶軸 [111] のレンズペアを構成している。しかしながら、第1比較例と同様に、石英レンズ L19 には、複屈折分布が付与されていない。

【0080】第2比較例では、投影視野の中心に形成される点像における最大光強度が 96.24% であり、投影視野の周辺の一端に形成される点像における最大光強度

21

度が96.81%であり、投影視野の周辺の他端に形成される点像における最大光強度が96.82%である。すなわち、第2比較例では、結晶軸[111]のレンズペアの作用により、複屈折の影響が低減され、第1比較例に比して投影光学系の結像性能が向上していることがわかる。

【0081】また、図7を参照すると、結晶軸[111]のレンズペアの作用により、3回回転対称の複屈折分布の傾向が低減され、投影視野の中心から周辺に亘って点像の光強度分布が第1比較例に比して全体的に円形状に近くなっている。その結果、第2比較例では、第1比較例に比して投影光学系の線幅均一性が向上していることがわかる。

【0082】次の表(4)に、第3比較例における各蛍石レンズの結晶軸の設定状態を示す。また、図8は、第3比較例における点像強度分布を示す図である。

【0083】

【表4】

| A | B | C |
|-----|-------|----|
| L3 | [111] | 0 |
| L8 | [111] | 0 |
| L13 | [111] | 60 |
| L15 | [111] | 0 |
| L22 | [100] | 0 |
| L23 | [100] | 45 |

【0084】表(4)を参照すると、第3比較例では、蛍石レンズL3、L8、L13およびL15において結晶軸[111]が光軸と一致するように設定され、蛍石レンズL3、L8およびL15と蛍石レンズL13とは光軸を中心として60度だけ相対的に回転した位置関係を有するように設定されている。すなわち、蛍石レンズL3、L8およびL15と、蛍石レンズL13とは、結晶軸[111]のレンズペアを構成している。

【0085】また、蛍石レンズL22およびL23において結晶軸[100]が光軸と一致するように設定され、蛍石レンズL22とL23とは光軸を中心として45度だけ相対的に回転した位置関係を有するように設定されている。すなわち、蛍石レンズL22と蛍石レンズL23とは、結晶軸[100]のレンズペアを構成している。しかしながら、第1比較例および第2比較例と同様に、石英レンズL19には、複屈折分布が付与されていない。

【0086】第3比較例では、投影視野の中心に形成される点像における最大光強度が97.92%であり、投影視野の周辺の一端に形成される点像における最大光強度が97.29%であり、投影視野の周辺の他端に形成される点像における最大光強度が97.31%である。すなわち、第3比較例では、結晶軸[111]のレンズペアと結晶軸[100]のレンズペアとの組み合わせ作用により、複屈折の影響がさらに低減され、第2比較例

22

に比して投影光学系の結像性能が向上していることがわかる。

【0087】また、図8を参照すると、結晶軸[111]のレンズペアと結晶軸[100]のレンズペアとの組み合わせ作用により、3回回転対称の複屈折分布の傾向が実質的に消え、投影視野の中心から周辺に亘って点像の光強度分布が第2比較例に比して全体的にさらに円形状に近くなっている。その結果、第3比較例では、第2比較例に比して投影光学系の線幅均一性が向上していることがわかる。

【0088】次の表(5)に、本実施形態における各蛍石レンズの結晶軸の設定状態を示す。また、図9は、本実施形態における点像強度分布を示す図である。

【0089】

【表5】

| A | B | C |
|-----|-------|----|
| L3 | [111] | 0 |
| L8 | [111] | 0 |
| L13 | [111] | 60 |
| L15 | [111] | 0 |
| L22 | [100] | 0 |
| L23 | [100] | 45 |

【0090】表(5)を参照すると、本実施形態では、第3比較例と同様に、蛍石レンズL3、L8およびL15と蛍石レンズL13とが結晶軸[111]のレンズペアを構成し、蛍石レンズL22と蛍石レンズL23とが結晶軸[100]のレンズペアを構成している。しかしながら、第1比較例～第3比較例とは異なり、石英レンズL19には、所定の複屈折分布が付与されている。

【0091】具体的には、露光光(193nm)に対して周辺で-3.8nm/cmの複屈折量(歪み量)を有し、中心で0nm/cmの複屈折量を有し、中心から周辺にかけて二次関数分布にしたがって変化するような複屈折分布、すなわち光軸に関して回転対称で周方向に進相軸がある複屈折分布を石英レンズL19に付与している。これは、第3比較例において結晶軸[100]のペアレンズの作用が支配的であって、径方向に進相軸がある複屈折分布が残っているので、石英レンズL19の周方向に進相軸がある複屈折分布によって相殺するためである。

【0092】本実施形態では、投影視野の中心に形成される点像における最大光強度が99.78%であり、投影視野の周辺の一端に形成される点像における最大光強度が99.57%であり、投影視野の周辺の他端に形成される点像における最大光強度が99.55%である。すなわち、本実施形態では、結晶軸[111]のレンズペアと結晶軸[100]のレンズペアとの組み合わせ作用および石英レンズL19の複屈折分布による補償作用により、複屈折の影響が非常に良好に低減され、第3比較例に比して投影光学系の結像性能が著しく向上してい

50

ることがわかる。

【0093】また、図9を参照すると、結晶軸[111]のレンズペアと結晶軸[100]のレンズペアとの組み合わせ作用および石英レンズL19の複屈折分布による補償作用により、投影視野の中心から周辺に亘って点像の光強度分布が全体的にほぼ円形状になっている。その結果、本実施形態では、第3比較例に比して投影光学系の線幅均一性が著しく向上していることがわかる。

【0094】なお、本実施形態では、石英の原料となるSi化合物ガス(Si化合物ガスを送り出すためにO₂、H₂等のキャリアガスが用いられる)と、加熱のための燃焼ガス(O₂ガスとH₂ガス)とをバーナーから流出し、火炎内で石英を堆積させる火炎加水分解法を用いて石英の合成を行って、インゴットを得る。その後、インゴットを切り出してディスク材を得て、このディスク材のアニール(又は徐冷)を行う。

【0095】そして、本実施形態では、石英からなる屈折部材(すなわち石英レンズL19)の複屈折分布が所望の複屈折分布となるように、石英の合成時の合成条件と、アニール時の熱履歴条件とを調整している。このとき、合成条件のパラメータとしては、バーナー構造、ガス流量、排気流量、ターゲットの揺動パターン等が挙げられる。なお、このような合成条件やアニール条件は、試行錯誤的に求めても良いし、経験則を用いて決定しても良い。なお、石英レンズL19に所望の複屈折分布を付与する方法の詳細については、たとえば特願2001-208837号明細書および図面を参照することができる。

【0096】なお、上述の本実施形態(および各比較例)では、萤石の固有複屈折の値として、2001年7月18日に開かれたリソグラフィに関するシンポジウム(International-SEMAFET Calcium Fluoride Birefringence Workshop)において、米国NIST(National Institute of Standards and Technology)のJohn H. Burnettによって発表された値を用いている。

【0097】また、上述の実施形態では、複屈折性の光学材料として萤石を用いているが、これに限定されるとなく、他の一軸性結晶、たとえばフッ化バリウム(BaF₂)、フッ化リチウム(LiF)、フッ化ナトリウム(NaF)、フッ化ストロンチウム(SrF₂)などを用いることもできる。この場合、フッ化バリウム(BaF₂)などの結晶軸方位も本発明に従って決定されることが好ましい。

【0098】上述の実施形態の露光装置では、照明装置によってレチクル(マスク)を照明し(照明工程)、投影光学系を用いてマスクに形成された転写用のパターンを感光性基板に露光する(露光工程)ことにより、マイクロデバイス(半導体素子、撮像素子、液晶表示素子、薄膜磁気ヘッド等)を製造することができる。以下、本実施形態の露光装置を用いて感光性基板としてのウェハ

等に所定の回路パターンを形成することによって、マイクロデバイスとしての半導体デバイスを得る際の手法の一例につき図10のフローチャートを参照して説明する。

【0099】先ず、図10のステップ301において、1ロットのウェハ上に金属膜が蒸着される。次のステップ302において、その1ロットのウェハ上の金属膜上にフォトレジストが塗布される。その後、ステップ303において、本実施形態の露光装置を用いて、マスク上のパターンの像がその投影光学系を介して、その1ロットのウェハ上の各ショット領域に順次露光転写される。その後、ステップ304において、その1ロットのウェハ上のフォトレジストの現像が行われた後、ステップ305において、その1ロットのウェハ上でレジストパターンをマスクとしてエッチングを行うことによって、マスク上のパターンに対応する回路パターンが、各ウェハ上の各ショット領域に形成される。

【0100】その後、更に上のレイヤの回路パターンの形成等を行うことによって、半導体素子等のデバイスが製造される。上述の半導体デバイス製造方法によれば、極めて微細な回路パターンを有する半導体デバイスをスループット良く得ることができる。なお、ステップ301～ステップ305では、ウェハ上に金属を蒸着し、その金属膜上にレジストを塗布、そして露光、現像、エッチングの各工程を行っているが、これらの工程に先立つて、ウェハ上にシリコンの酸化膜を形成後、そのシリコンの酸化膜上にレジストを塗布、そして露光、現像、エッチング等の各工程を行っても良いことはいうまでもない。

【0101】また、本実施形態の露光装置では、ブレート(ガラス基板)上に所定のパターン(回路パターン、電極パターン等)を形成することによって、マイクロデバイスとしての液晶表示素子を得ることもできる。以下、図11のフローチャートを参照して、このときの手法の一例につき説明する。図11において、パターン形成工程401では、本実施形態の露光装置を用いてマスクのパターンを感光性基板(レジストが塗布されたガラス基板等)に転写露光する、所謂光リソグラフィ工程が実行される。この光リソグラフィ工程によって、感光性基板上には多数の電極等を含む所定パターンが形成される。その後、露光された基板は、現像工程、エッチング工程、レチクル剥離工程等の各工程を経ることによって、基板上に所定のパターンが形成され、次のカラーフィルター形成工程402へ移行する。

【0102】次に、カラーフィルター形成工程402では、R(Red)、G(Green)、B(Blue)に対応した3つのドットの組がマトリックス状に多数配列されたり、またはR、G、Bの3本のストライプのフィルターの組を複数水平走査線方向に配列されたりしたカラーフィルターを形成する。そして、カラーフィルター形成工程4

02の後に、セル組み立て工程403が実行される。セル組み立て工程403では、パターン形成工程401にて得られた所定パターンを有する基板、およびカラーフィルター形成工程402にて得られたカラーフィルター等を用いて液晶パネル（液晶セル）を組み立てる。セル組み立て工程403では、例えば、パターン形成工程401にて得られた所定パターンを有する基板とカラーフィルター形成工程402にて得られたカラーフィルターとの間に液晶を注入して、液晶パネル（液晶セル）を製造する。

【0103】その後、モジュール組み立て工程404にて、組み立てられた液晶パネル（液晶セル）の表示動作を行わせる電気回路、バックライト等の各部品を取り付けて液晶表示素子として完成させる。上述の液晶表示素子の製造方法によれば、極めて微細な回路パターンを有する液晶表示素子をスループット良く得ることができる。

【0104】なお、上述の実施形態では、露光装置に搭載される投影光学系に対して本発明を適用しているが、これに限定されることなく、他の一般的な投影光学系に対して本発明を適用することもできる。また、上述の実施形態では、193nmの波長光を供給するArFエキシマレーザー光源を用いているが、これに限定されることなく、たとえば157nmの波長光を供給するF₂レーザー光源や、248nmの波長光を供給するKrFエキシマレーザー光源などを用いることもできる。なお、露光光としてたとえば157nmの波長光を供給するF₂レーザー光源などの真空紫外光を用いる場合には、非結晶透過部材を形成する非結晶材料として、真空紫外光に対して透過性を有する改質石英（たとえばフッ素がドープされた石英）を用いることが好ましい。

【0105】

【発明の効果】以上説明したように、本発明では、たとえば蛍石のような固有複屈折を持つ光学材料を用いても、複屈折の影響を実質的に受けることなく良好な光学性能を有する投影光学系を実現することができる。したがって、本発明では、複屈折の影響を実質的に受けること*

*となく良好な光学性能を有する本発明の投影光学系を用いた露光装置および露光方法において、高解像で高精度な投影露光を行うことができる。また、本発明の投影光学系を搭載した露光装置を用いて、高解像な投影光学系を介した高精度な投影露光により、良好なマイクロデバイスを製造することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】蛍石の結晶軸方位について説明する図である。

【図2】Burnettらの手法を説明する図であって、光線の入射角に対する複屈折率の分布を示している。

【図3】本発明の手法を説明する図であって、光線の入射角に対する複屈折率の分布を示している。

【図4】本発明の実施形態にかかる投影光学系を備えた露光装置の構成を概略的に示す図である。

【図5】本実施形態にかかる投影光学系のレンズ構成を示す図である。

【図6】第1比較例における点像強度分布を示す図である。

【図7】第2比較例における点像強度分布を示す図である。

【図8】第3比較例における点像強度分布を示す図である。

【図9】本実施形態における点像強度分布を示す図である。

【図10】マイクロデバイスとしての半導体デバイスを得る際の手法のフローチャートである。

【図11】マイクロデバイスとしての液晶表示素子を得る際の手法のフローチャートである。

【符号の説明】

L S 光源

I L 照明光学系

R レチクル

R S レチクルステージ

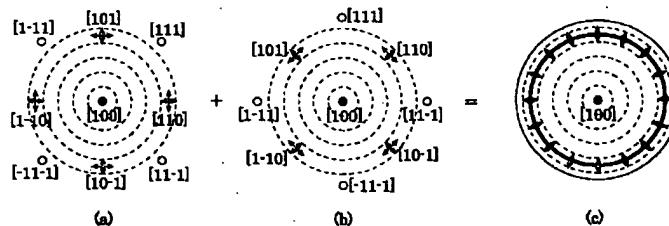
P L 投影光学系

W ウェハ

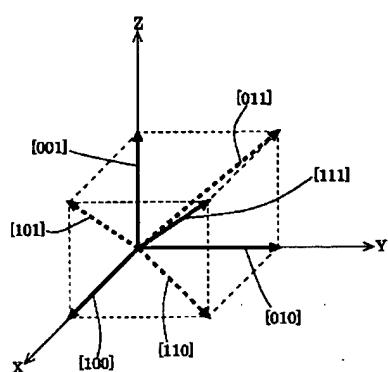
W S ウェハステージ

L 1～L 2 3 レンズ成分

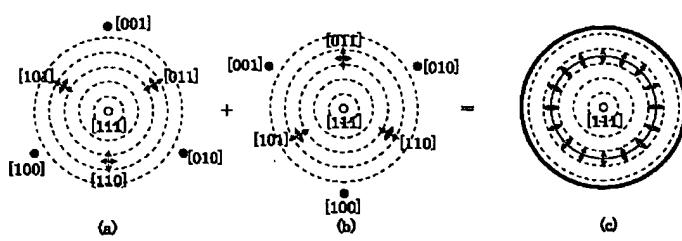
【図3】



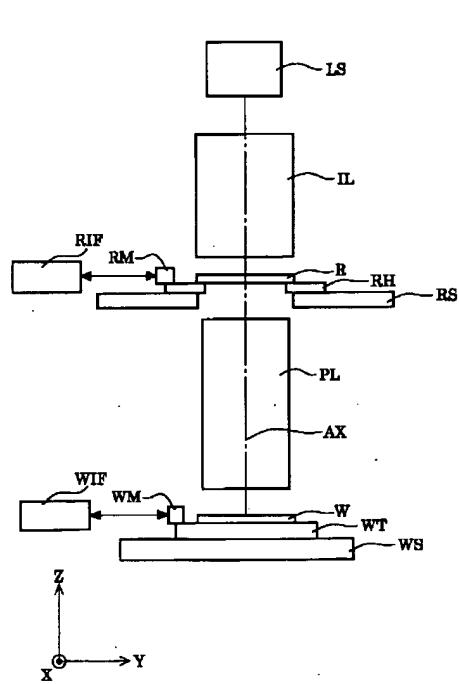
【図1】



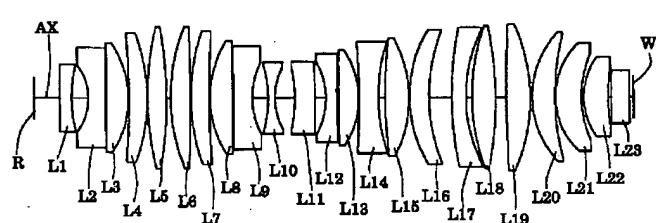
【図2】



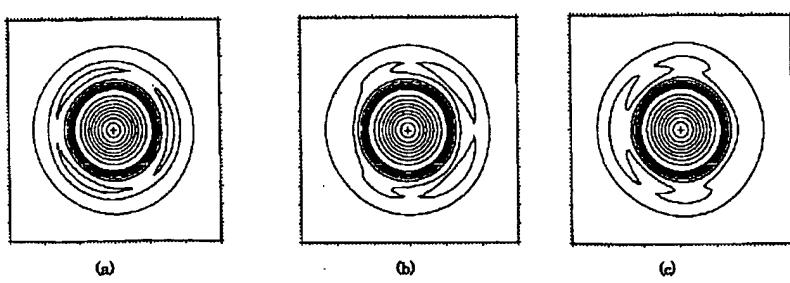
【図4】



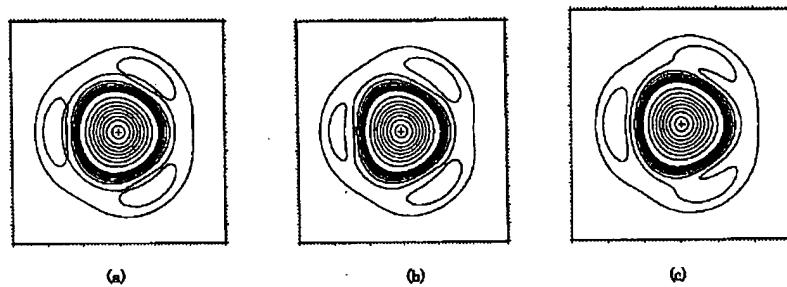
【図5】



【図7】



【図6】

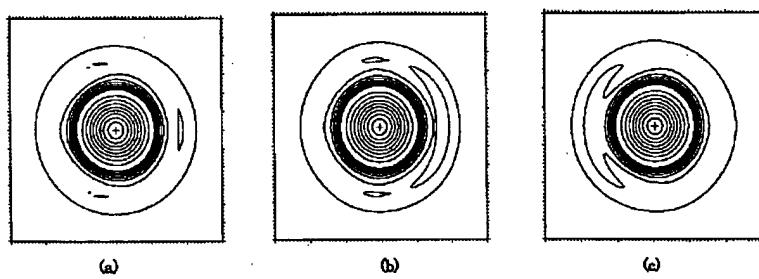


(a)

(b)

(c)

【図8】

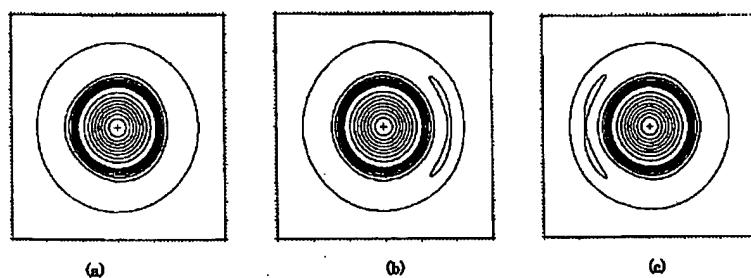


(a)

(b)

(c)

【図9】

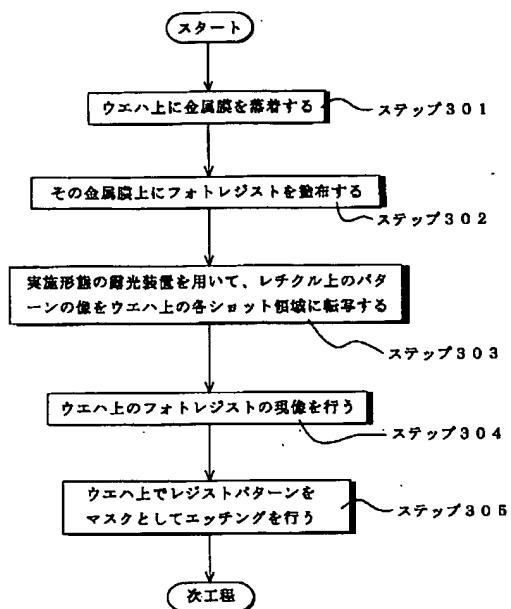


(a)

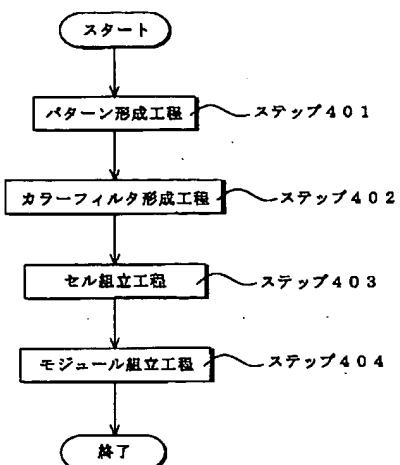
(b)

(c)

【図10】



【図11】



フロントページの続き

(72)発明者 小澤 稔彦
 東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株
 式会社ニコン内

F ターム(参考) 2H087 KA21 LA01 NA00 NA02 NA04
 NA09 PA15 PA17 PB20 QA01
 QA05 QA18 QA22 QA25 QA33
 QA41 QA45 RA05 RA12 RA13
 UA03 UA04
 2H097 CA13 GB01 LA10
 5F046 BA04 CB12 CB25